干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于多时相Landsat影像的中亚地区植被覆盖遥感监测

王　华[1,2]，　杨乾鹏[1]，　田云杰[1]，　郭山川[3]，　唐鹏飞[3]
（1　西藏林芝市气象局，西藏　林芝　860000；2　南京农业大学资源与环境科学学院，江苏　南京　210095；
3　南京大学地理与海洋科学学院，江苏　南京　210023）

摘　要： 针对中亚地区的强生态脆弱性、高敏感性特征，有必要开展广域、长期的植被覆盖监测以匹配"绿色丝绸之路"的可持续发展目标。鉴于此，联合Landsat 5和Landsat 8卫星数据集，利用Google Earth Engine(GEE)地理空间数据云计算平台，估算了中亚地区1993—2018年间共12期的植被覆盖度。结果表明：(1)中亚地区植被覆盖总体水平较低，但也具有较为显著的空间异质性。(2)中亚地区1993—2018年间多数区域植被覆盖趋势较为稳定，哈萨克斯坦丘陵、费尔干纳盆地等区域植被覆盖度呈增加趋势，乌拉尔河流域和锡尔河流域等区域植被覆盖趋势为负。(3)植被覆盖度时序特征上，中亚地区1993—2018年间总体植被覆盖度累积增加3%，其中吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦植被覆盖分别增加3.96%和5.86%。(4)裸土区呈退缩趋势，面积总计减少25.9×10^4 km^2，低植被覆盖区、中植被覆盖区和高植被覆盖区范围在呈现出的振荡式增加。研究结合遥感大数据和地理云计算对中亚地区进行区域尺度的植被覆盖动态监测，能对中亚地区生态评估和演替分析提供技术支持和定量数据。

关 键 词： 植被覆盖监测；中亚地区；GEE；多时相Landsat影像；归一化植被指数
文章编号： 1000-6060(2020)04-1023-10(1023~1032)

中亚地区地处亚欧大陆腹地，是典型的温带沙漠、草原干旱区，其生态环境承载力脆弱、水资源紧缺[1-3]。近年来，由于人类活动和全球气候变化对中亚地区生态环境的持续扰动，造成了该区域土地荒漠化、草原退化、水资源过量开发等系列生态环境问题[4-6]。同时由于特殊地缘条件，中亚地区被称为"世界历史的地理枢纽"，也是丝绸之路经济带的极为重要节点之一[7]。随着"一带一路"国家战略的纵深推进，中亚地区的脆弱生态环境将面临新的考验。为推行生态友好型的发展模式，从而确保"绿色丝绸之路"可持续发展，亟需开展区域尺度的长时序生态监测和系统性研究[8]。

植被作为生态系统中基础生产者，其覆盖状况直接反应了生态系统的结构和功能[9]。尤其是以草原生态系统为主的中亚地区，植被覆盖是最为关键的生态参数之一。与传统的实地测样、分析的植被监测方法相比，遥感影像的植被监测手段的突出优势在于空间连续覆盖监测、大范围、低成本。归一化植被覆盖指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)利用植被对近红外波段和红光波段的反射率差异，能够有效地提取植被覆盖信息，广泛地应用于森林监测、草原监测、农作物估产、干旱监测等诸多领域[10-16]。因此，基于*NDVI*的植被覆盖估算能够有效测度区域尺度的植被覆盖率[17-19]。目前，针对中亚区域的植被覆盖遥感监测主要有两方面：(1)利用中低分辨率MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS)数据的广域植被覆盖度估算及演变分析研究[20-22]。(2)利用陆地卫星(Landsat)影像对中亚局部区域进行植被覆盖动态监测[23]。与MODIS数据相比，Landsat卫星

收稿日期： 2019-06-19；　**修订日期：** 2020-03-20
基金项目： 西藏自治区科技计划项目(XZ201801-GB-12)；国家自然科学基金项目(41472207,41631176)资助
作者简介： 王华(1989-)，女，四川犍为人，在读硕士，工程师，研究方向为植被遥感监测. E-mail:825222166@qq.com
通讯作者： 杨乾鹏. E-mail:yangqp929@163.com

的优势体现在较高的空间分辨率(30 m)和更长的时间跨度数据积累,能够为广域、长时间序列植被监测提供更好的数据支撑[24]。但广域、较高分辨率、长时间序列的Landsat数据处理、分析受限于算力,目前还相当缺乏相关数据产品和研究。Google Earth Engine(GEE)是针对于地理空间数据处理、分析、可视化的云计算平台,能够有效地提高遥感大数据处理的效率[25],是地理大数据计算与分析的强大工具。

鉴于此,顾及中亚区域尺度下的数据空间覆盖率和植被季节周期特征,利用GEE平台调用和核查了所有可用的Landsat系列卫星的TM数据和OLI数据,将1993年、1994年、1998年、2008年、2009年、2010年、2013年、2014年、2015年、2016年、2017年和2018年等确定为研究年份,并估算了这些年份中亚地区的植被覆盖度。然后以空间分布和时序特征角度,定量揭示了1993—2018年中亚地区植被覆盖度的时空演变规律。本文能为大尺度区域Landsat植被覆盖制图及其环境响应分析提供可行的技术流程和方法借鉴,同时长时间序列的植被覆盖度估算结果对"一带一路"战略可持续、深度推进也具有重要意义[26]。

1 研究区概况与数据概况

1.1 研究区概况

中亚地区包括了哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦等区域。该区域的地理位置处于46°16′ E ~ 87°38′ E,35°11′ N ~ 55°24′ N,行政上介于中国、俄罗斯、伊朗、巴基斯坦和阿富汗等国之间,面积共约405×10^4 km^2[27]。中亚地区地形呈现东南高(帕米尔高原、喀喇昆仑山脉、天山山脉、阿尔泰山脉)、西北低(图兰低地)。由于山脉和高原阻截了来自印度洋的暖湿气流,同时又具有充足的日照条件,中亚地区的蒸发量远高于降水量,从而成为最为典型的干旱区之一。区域内河流走向受到地形影响为西北走向,均为无出海口的内陆河流。在温带大陆性气候的影响下,中亚干旱区的土地覆被类型主要是草地和荒漠[28]。在地缘条件方面,中亚地区是丝绸之路的"通"中之重,能源资源非常丰富,与中国的经济结构具有明显的互补性,具有重要的战略地位。

1.2 数据概况

本研究采用的遥感数据包括了美国National Aeronautics and Space Administration(NASA)的陆地卫星计划中Landsat 5专题测绘仪(Thematic Mapper, TM)数据和Landsat 8陆地成像仪(Operational Land Imager, OLI)数据利用大气辐射校正后的地表反射率产品(Land Surface Reflectance, LSR)。覆盖中亚地区的Landsat影像共涉及276个条带号/行列号(参照World Wide Reference System 2, WRS2),如表1所示。为确保影像能够覆盖整个中亚地区,采用了植被生长季节(5、6、7、8、9月)所有可用的Landsat影像。由于中亚区域经纬度跨度范围大和

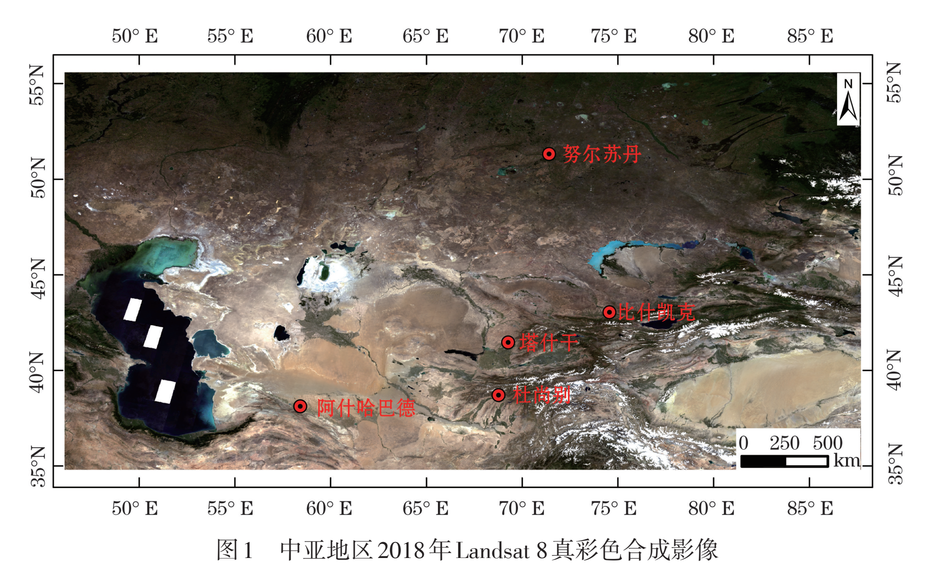


图1 中亚地区2018年Landsat 8真彩色合成影像

Fig. 1 Imagery of the Central Asian countries in 2018 from Landsat 8 true color composite

云层覆盖影响，一幅全区完整的影像需要对大量数据进行处理、滤波和拼接。如：2018年的中亚地区影像共处理了2 396幅OLI影像。受限于Landsat 5 TM影像的数据在中亚地区的时空覆盖率，为满足研究区域数据空间覆盖范围的完整性，在时间维度上，选择了1993年、1994年、1998年、2008年、2009年、2010年、2013年、2014年、2015年、2016年、2017年和2018年为植被覆盖估算的年份。其余年份的数据均无法满足空间范围全覆盖的要求。

表1　中亚地区范围内Landsat条带号/行列号参照表

Tab. 1　Reference table of path / row number of Landsat within five Central Asian countries

条带号	行列号	条带号	行列号
144	25－27	158	21－35
145	25－27	159	21－35
146	25－29	160	22－34
147	24－31	161	22－34
148	24－32	162	22－34
149	24－32,34	163	22－34
150	23－34	164	24－33
151	23－35	165	24－32
152	22－34	166	24－30
153	22－34	167	24－29
154	22－34	168	24－28
155	22－34	169	24－28
156	21－35	170	24－27
157	21－36	171	25－26

2　研究方法

2.1　数据预处理

不同于单景影像预处理流程，GEE以数据集概念切入建立数据集预筛选、处理工作流。由于直接调用了GEE中的LSR产品（LEDAPS校正）[29]，而不再需要辐射校正处理，技术路线如图2所示。数据筛选的条件：（1）拍摄覆盖包含中亚地区的所有影像。（2）观测时间为植被生长季节（5～9月份）期间的所有影像。数据预处理主要包括：（1）利用CF-MASK算法进行云、阴影掩膜[30]。（2）采用时序上的中值滤波方法使每年的数据集融合为一景范围全覆盖、质量均衡平稳的无云影像。（3）影像裁剪、拼接。（4）逐一核查年合成影像，剔除由于Landsat数据集本身空间覆盖率不足造成的空间覆盖率低的年合成影像。

中亚地区Landsat影像缺失现象较为明显，因此通过增加数据采集时间，来提高大尺度下的影像空间覆盖率。同时，通过时序上中值滤波处理可以有效地减小不同条带号由于观测期不同造成的影像色差，增强了影像质量的稳定性。最后，不同年份的数据集进行中值滤波处理后，提高了影像在时序上的鲁棒性和可对比性。

2.2　植被覆盖估算

归一化植被指数是遥感影像中近红外波段的反射值和红光波段的反射值之差与其之和的比值（式1），是反映植被覆盖的重要参数之一。Landsat 5 TM影像的3、4波段分别对应了红光波段和近红外波段，而Landsat 8 OLI影像的红光波段和近红外波段分别式4、5波段。

$$NDVI=\frac{NIR-RED}{NIR+RED} \tag{1}$$

像元二分模型假设地表单元是由植被覆盖与非植被覆盖构成，是混合像元分解模型中最简单的模型。但其形式简洁而且具有一定物理意义，因此广泛应用于植被覆盖度估算研究中[31]。针对中亚地区的植被覆盖估算，已有学者分析了像元二分模型的适用性和可靠性[21]。鉴于此，采用像元二分模型（式2）估算中亚地区的植被覆盖度：

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{soil}}{NDVI_{veg}-NDVI_{soil}} \tag{2}$$

式中：FVC是植被覆盖度；$NDVI$是归一化植被指数；$NDVI_{soil}$是裸土的$NDVI$值；$NDVI_{veg}$是全植被像元的

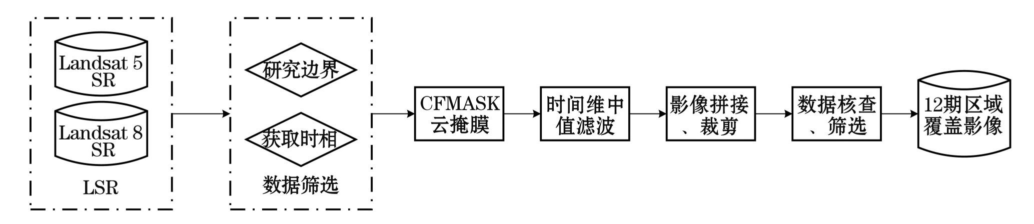


图2　基于GEE平台LSR数据筛选及预处理工作流

Fig. 2　The workflow of data filtering and preprocessing of LSR based on GEE platform

*NDVI*值。中亚地区的植被覆盖最高的区域分布在天山山脉、阿尔泰山山脉等区域，此类区域得益于雪山融化补给地表水，覆盖着西伯利亚落叶松和雪岭云杉等针叶林，植被覆盖最大的接近于1，其*NDVI*多年均值约为0.9。卡拉库姆沙漠、克孜勒库姆沙漠等沙漠区域无植被覆盖，此类区域的*NDVI*＜0.1。因此，本文中$NDVI_{veg}$设为0.9，$NDVI_{soil}$设为0.1。

采用一元线性回归分析，分析植被覆盖度序列数据趋势。趋势分析对每个像元的植被覆盖度进行时序建模，通过其变化特征反应一定时间序列的植被覆盖格局演变。其计算公式如下：

$$\theta_{slope}=\frac{n\sum_{i=1}^{n}Y_i\times FVC_i-\sum_{i=1}^{n}Y_i\sum_{i=1}^{n}FVC_i}{n\sum_{i=1}^{n}Y_i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}Y_i\right)^2} \quad (3)$$

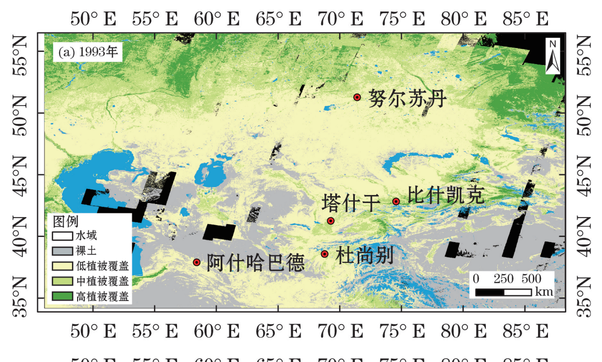
式中：θ_{slope}是植被覆盖度FVC_i回归方程的斜率；n是植被监测年数；Y_i是序号i对应的年份。若θ_{slope}值为正，则表明植被覆盖度增加，反之表明植被覆盖退化。

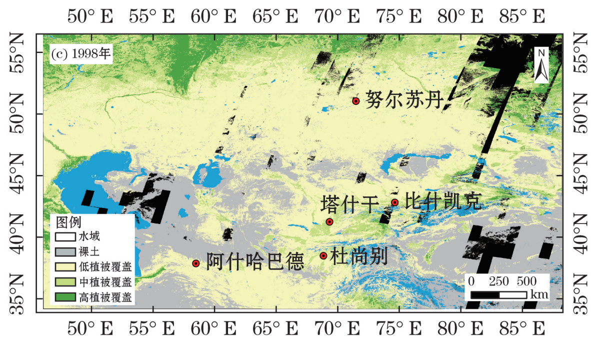
3 结果与分析

3.1 植被覆盖度估算结果

中亚地区1993—2018年间植被覆盖测度结果如图3所示，其中水域（湖泊、河流以及积雪冰川）是由*NDVI*负值区域掩膜而来。参考等间距原则并结合Google Earth高分影像采集的样本，将中亚地区植被覆盖测度结果划分为以下4个等级：（1）裸土，即无植被覆盖区域（$FVC\leqslant0$）。（2）低植被覆盖区域（$0<FVC\leqslant0.3$）。（3）中植被覆盖区域（$0.3<FVC\leqslant0.6$）。（4）高植被覆盖区域（$0.6<FVC\leqslant1$）。

在总体上，中亚地区整体的植被覆盖的空间格局表现为植被覆盖度较低（2018年区域植被覆盖度为0.18），反应了中亚地区大部分区域是受干燥气候条件影响而形成的生态脆弱干旱区。但是植被覆盖的空间格局也存在异质性，主要有以下三个典型区域：（1）图兰平原的植被呈现出大范围的低覆盖。尤其是该区的沙漠区域（占平原面积一半）植被覆盖极为稀疏趋近于无植被覆盖，其中主要包括卡拉库姆沙漠（土库曼斯坦境内），克孜勒库姆沙漠（地跨乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦）。（2）中亚地区境内由东南向东北方向分布有帕米尔高原、喀拉昆仑山脉、昆仑山脉、天山山脉和阿尔泰山脉，由于夏季高原冰川融化，水资源补给较足，使这些区域的植被覆盖情况较好，在图3中呈现出浅绿色和深绿色。（3）中亚区域北部的哈萨克斯坦丘陵区域形成迎风坡，阻挡来自大西洋的暖湿气流从而形成降雨，因此该区域植被覆盖情况也相对较好。





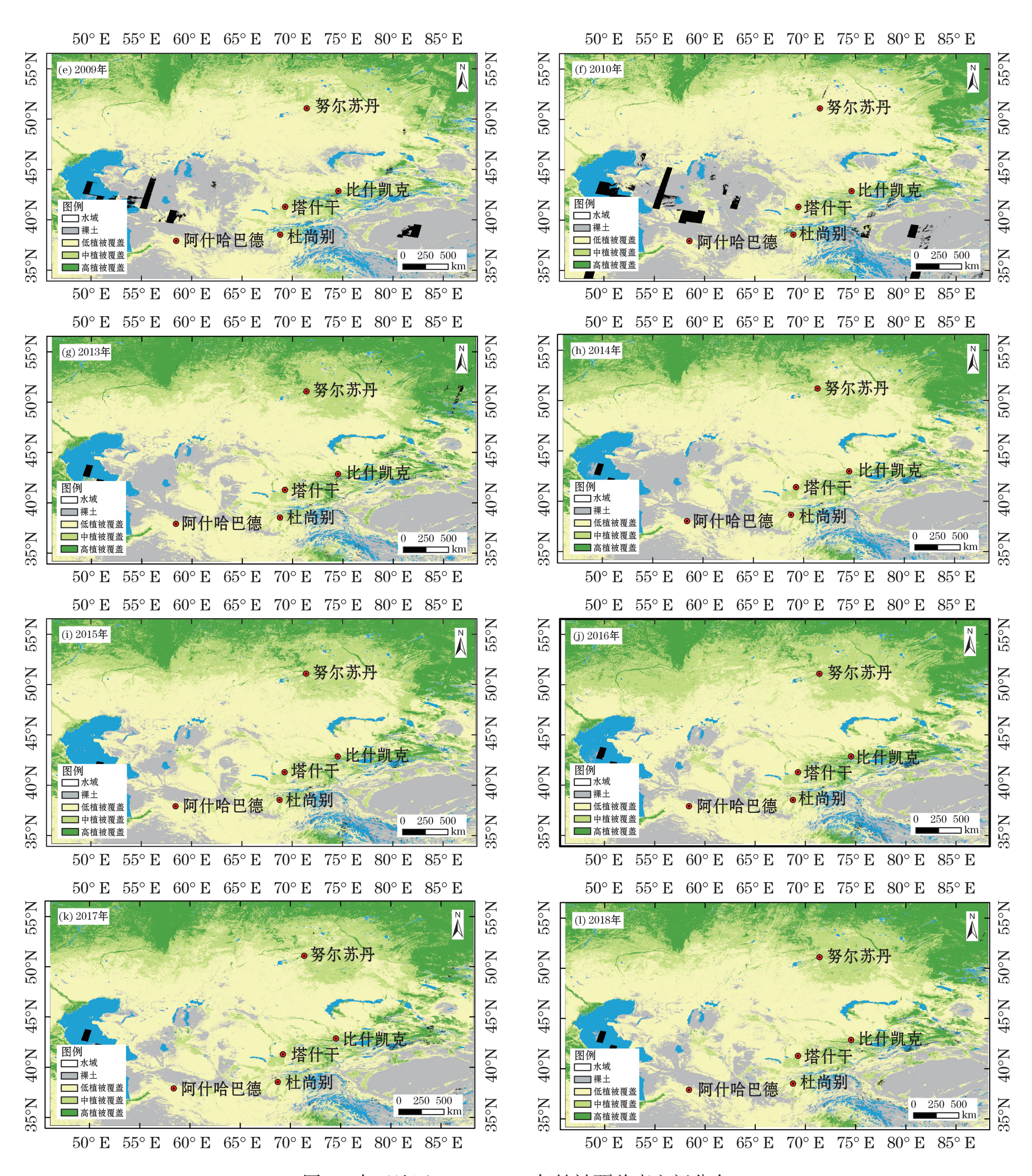


图3　中亚地区1993—2018年植被覆盖度空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of vegetation coverage over the Central Asian countries between 1993 and 2018

3.2　植被覆盖空间格局演变分析

中亚地区1993—2018年植被覆盖度趋势变化空间格局如图4所示(图中空白区域是由历年Landsat影像缺失区累积而成)。从植被覆盖变化趋势空间格局上看，中亚地区1993—2018年期间大部分区域植被覆盖度保持在较稳定状态。图4中，植被覆盖度呈增加的趋势的区域主要有：(1) 天山山脉、帕米尔高原和阿尔泰山山脉的山间盆谷地带，如费尔干纳盆地。(2) 哈萨克斯坦中部丘陵。草原退化、荒漠化等植被覆盖趋势下降的区域主要在乌拉尔河流域(C区域)以及位于克孜勒库姆沙漠以北锡尔河流域(D区域)。同时，可以发现原世界第四大湖的咸海区域(A区域)的植被覆盖测度值变化趋势较为明显，但需要说明的是该现象并不是由植被覆盖度

增加造成，而是土地覆被类型由水体转移为裸土导致。咸海流域由于过量的工农业用水导致其水位下降、面积萎缩，从而裸露出湖床沉积层。

采用F检验对中亚地区1993—2018年的植被覆盖趋势进行显著性检验，检验后的结果被分为五类。其中，变化不显著（$P>0.05$）区域面积为348.56×10^4 km^2，占比86.03%；显著减少（$\theta_{slope}<0$，$0.01<P\leqslant0.05$）与极显著减少（$\theta_{slope}<0$，$P\leqslant0.01$）区域面积共为4.85×10^4 km^2，占比1.19%；显著增加（$\theta_{slope}>0$，$0.01<P\leqslant0.05$）与极显著增加（$\theta_{slope}>0$，$P\leqslant0.01$）面积和为18.88×10^4 km^2，占比5.07%。中亚地区总体植被覆盖趋势均值0.0029，表明了中亚地区总体较为稳定的植被覆盖变化趋势。如表2所示，包含卡拉库姆沙漠的土库曼斯坦植被覆盖趋势测度值最小；地处天山山脉西段的吉尔吉斯斯坦的植被覆盖多样性和复杂性较强，植被覆盖趋势增加，但由于该区域植被空间分布异质性强，造成该区域植被覆盖趋势的标准差较大；土库曼斯坦境内土地利用/覆盖类型较为单一，主要由沙漠和裸土地表构成，该区域空间同质性强，造成植被覆盖变化趋势最为稳定。

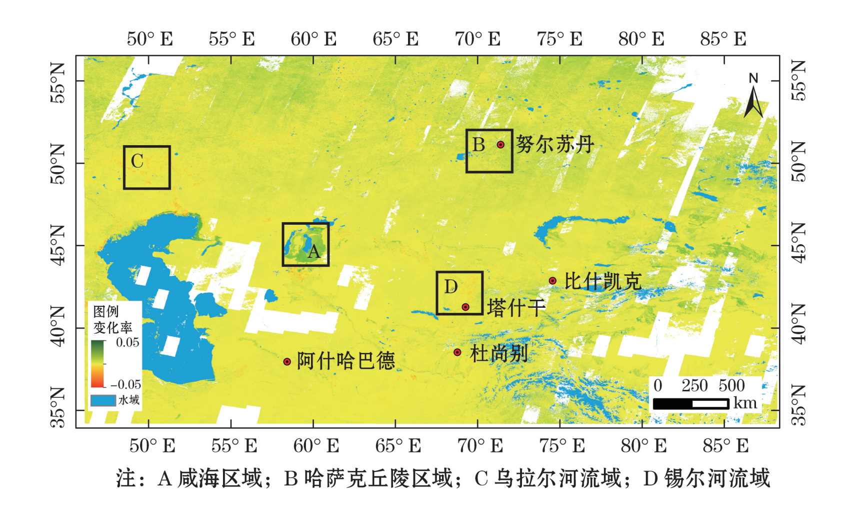
表2　中亚地区1993—2018年植被覆盖趋势统计表

Tab. 2　Statistic table of vegetation coverage trend over the Central Asian countries between 1993 and 2018

国家	Slope均值 / 10^{-3}	Slope标准差 / 10^{-3}
吉尔吉斯斯坦	3.50	16.02
哈萨克斯坦	3.23	4.66
塔吉克斯坦	3.12	8.10
土库曼斯坦	0.99	3.25
乌兹别克斯坦	1.97	5.87

3.3　不同国家植被覆盖度时序演变分析

1993—2018年中亚地区植被覆盖度均值变化曲线如图5(a)所示，中亚地区植被覆盖度由高至低依次是吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦。总体上，中亚地区1993—2018年间，植被覆盖度累积增加3%。其中，植被覆盖累积增加率最高的是塔吉克斯坦，达到5.86%；而土库曼斯坦由于境内几无植被覆盖，25 a间植被覆盖度基本不变。1993—1998年期间，中亚地区植被覆盖总体呈显著减小趋势，达到−7%；而1998—2018年，中亚地区植被覆盖度成振荡式增加趋势，期间植被覆盖度累积增加10%。



注：A 咸海区域；B 哈萨克丘陵区域；C 乌拉尔河流域；D 锡尔河流域

图4　中亚地区1993—2018年植被覆盖度变化趋势空间格局

Fig. 4　Spatial pattern of vegetation coverage trend over the Central Asian countries between 1993 and 2018

中亚地区1993年、1994年、1998年和2008年植被覆盖度空间分布较为稳定，其标准差均低于0.3。但此之后，植被覆盖度在空间上趋于分化，吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦的空间异质性尤为显著。上述两国境内坐落有天山山脉和帕米尔高原，区域内的冰川雪山对全球气候变化具有较强的敏感性，从而影响局部气候区，使植被覆盖度及其空间分布呈现出较强的时序波动特征。研究结果与利用中分辨率MODIS数据估算中亚地区草地覆盖度时空特征保持较高的一致性[21]。低分辨率GIMMS数据的

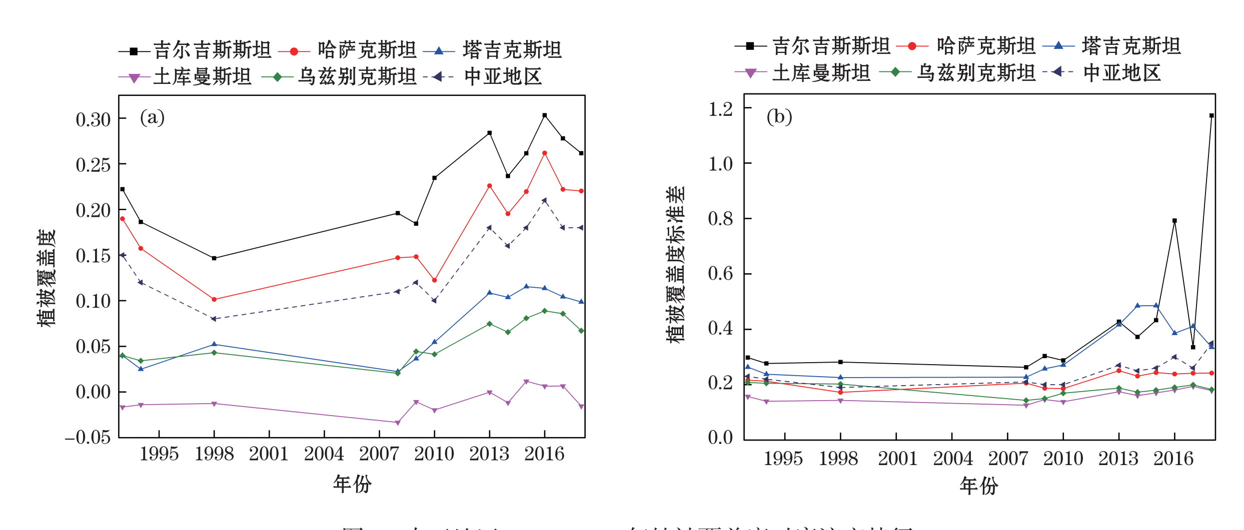


图5　中亚地区1993—2018年植被覆盖度时序演变特征

Fig. 5　Temporal features of vegetation coverage over the Central Asian countries between 1993 and 2018

估算结果表明,中亚地区1982—2012年期间NDVI呈现出微弱增长趋势[6],也吻合本文结论。

3.4　不同植被覆盖区面积时序变化分析

通过空间统计各期影像1993—2018年水域、裸土、低植被覆盖、中植被覆盖和高植被覆盖面积,其占比结果如图6所示。总体上,1993—2018年监测期间,无植被覆盖裸土的覆盖范围呈退缩趋势,面积总计减少25.9×10^4 km^2。低植被覆盖区总体上呈现出扩张趋势,1993—2018年其面积总计增加19.6×10^4 km^2。中植被覆盖区和高植被覆盖区面积在1993—2018年间振荡式增加,累积增加量分别为9.5×10^4 km^{2}和7.1×10^4 km^2。水域主要由于咸海收缩,1993—2018年间面积总计减少5.3×10^4 km^2,其中1998－2008年减少量最为剧烈,减少面积达到4.3×10^4 km^2,占累积损失量的82%,表明了此期间中亚地区干燥气候对地表环境造成较强的扰动。同时,1998年—2008年间低植被覆盖面积总共减少38.5×10^4 km^2,而裸土面积增加了28.1km^2,也反映了该期间区域生态环境的退化较为明显。

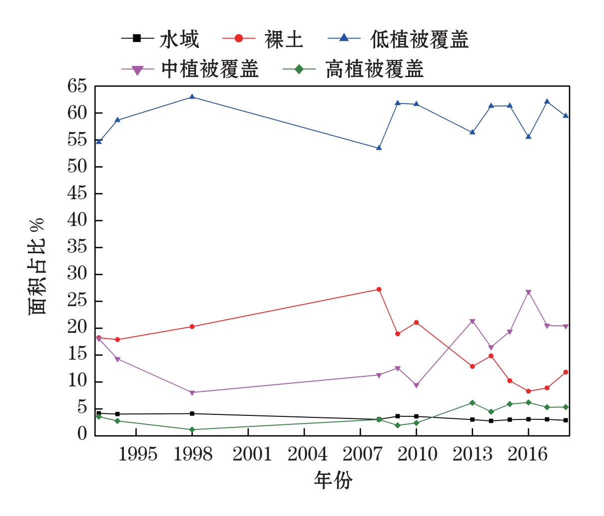


图6　中亚地区1993—2018年不同区域植被覆盖面积占比变化时序特征

Fig. 6　Temporal features of area proportion of different regions within the Central Asian countries between 1993 and 2018

4　结 论

2013年"一带一路"的国家战略(共建"丝绸之路经济带"和"21世纪海上丝绸之路"合作倡议)的提出使中亚地区的地理区域优势极具突出。中亚地区作为"一带一路"的重要节点和通道,决定了中国与其的联系将更加紧密从而形成"命运共同体"。倡导既要"金山"、"银山",又要绿水青山的发展模式对区域经济结构和生态环境的协调匹配度提出了更高、更科学的要求。在此,本研究采用Landsat长时序数据,利用GEE云计算平台,实现了中亚地区1993—2018年区域大尺度、较高分辨率(30 m)的植被覆盖度估算,并以空间格局和时序特征角度切入具体分析了中亚地区植被覆盖的时空演变规律。结果表明:

(1)在空间格局上,中亚区域植被覆盖具有较强的空间异质性,其典型植被覆盖区域包含:由低植被覆盖荒漠和无植被覆盖沙漠构成的图兰低地,较高植被覆盖的哈萨克斯坦丘陵以及高植被覆盖的东部天山、阿尔泰山区域。

（2）植被覆盖趋势空间特征上，中亚地区1993—2018年间多数区域植被覆盖趋势较为稳定，而植被覆盖趋势增加主要分布在东部费尔干那盆地、哈萨克斯坦中部丘陵区域，趋势减少的区域主要有乌拉尔河流域和锡尔河流域。

（3）植被覆盖度时序特征上，中亚地区1993—2018年间总体植被覆盖度累积增加3%。吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦植被覆盖呈现出较为显著的增加趋势，分别增加3.96%和5.86%。土库曼斯坦境内多为荒漠和沙漠，其植被覆盖常年维持不变。

（4）植被覆盖类别范围演变特征上，1993—2018年无植被覆盖裸土的覆盖范围呈退缩趋势，面积总计减少25.9×10^4 km^2。水域主要由于咸海收缩，面积总计减少5.3×10^4 km^2。低植被覆盖区、中植被覆盖区和高植被覆盖区范围在1993—2018年期间呈现出的振荡式扩张特征。

综上所述，本文通过利用Landsat遥感数据，结合GEE平台，从空间大尺度和较高分辨率上提取分析中亚地区的植被覆盖情况以及演变规律。该研究结果有利于从整体上了解中亚地区的植被覆盖状况、演变规律乃至湖泊水面变化规律，从而为“一带一路”国家战略的精准、纵深推进提供空间大尺度的生态环境参考和数据基础。

参考文献(References)

[1] 杨莲梅，关学锋，张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征[J]. 干旱区研究，2018，35(2)：249－259. [YANG Lianmei, GUAN Xuefeng, ZHANG Yinxing. Study on atmospheric circulation characteristics of precipitation anomalies in arid region of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 249－259.]

[2] 刘玉芝，吴楚樵，贾瑞，等. 大气环流对中东亚干旱半干旱区气候影响研究进展[J]. 中国科学：(地球科学)，2018，48(9)：1141－1152. [LIU Yuzhi, WU Chuqiao, JIA Rui, et al. An overview of the influence of atmospheric circulation on the climate in arid and semi-arid region of Central and East Asia[J]. Science China (Earth Sciences), 2018, 61(9): 1183－1194.]

[3] 胡汝骥，姜逢清，王亚俊，等. 中亚（五国）干旱生态地理环境特征[J]. 干旱区研究，2014，31(1)：1－12. [HU Ruji, JIANG Fengqing, WANG Yajun, et al. Arid ecological and geographical conditions in five countries of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 1－12.]

[4] 陈文倩，丁建丽，谭娇，等. 基于DPM-SPOT的2000—2015年中亚荒漠化变化分析[J]. 干旱区地理，2018，41(1)：119－126. [CHEN Wenqian, DING Jianli, TAN Jiao, et al. Desertification change in Central Asia based on DPM-SPOT from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 119－126.]

[5] 郑佳佳. 基于多源卫星数据的中亚地区湖泊水量变化监测研究[D]. 南京：南京大学，2017. [ZHENG Jiajia. Monitering and analysis of lake water storage changes in Central Asia using multi-mission satellite date[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.]

[6] 殷刚，孟现勇，王浩，等. 1982—2012年中亚地区植被时空变化特征及其与气候变化的相关分析[J]. 生态学报，2017，37(9)：3149－3163. [YIN Gang, MENG Xianyong, WANG Hao, et al. Spatial-temporal variation of vegetation and its correlation with climate change in Central Asia during the period of 1982－2012[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3149－3163.]

[7] 曾向红. “通”中之重：“丝绸之路经济带”建设在中亚[J]. 当代世界，2019，39(2)：74－78. [ZENG Xianghong. Priorities in interconnection: Silk Road Economic Belt in Central Asia[J]. Contemporary World, 2019, 39(2): 74－78.]

[8] 蒋宇宁，王雅莉. “一带一路”倡议下中国与中亚地区贸易合作的竞争性与互补性研究[J]. 内蒙古社会科学，2018，39(5)：128－135. [JANG Yuning, WANG Yali. Research of the competitiveness and complementarity of trade cooperation between China and Central Asia under the Initiative of Belt and Road[J]. Inner Mongolia Social Sciences, 2018, 39(05): 128－135.]

[9] 盛任，万鲁河. 乌伊岭国家级自然保护区植被覆盖演变及其对气候突变的响应[J]. 生态学报，2019，39(9)：3243－3256. [SHENG Ren, WAN Luhe. Evolution of vegetation coverage and its response to abrupt climate change in the Wuyi Mountains National Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3243－3256.]

[10] PRAVALIE R, SIRODOEV I, PEPTENATU D. Detecting climate change effects on forest ecosystems in Southwestern Romania using Landsat TM NDVI data[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5): 815－832.

[11] 刘斌，孙艳玲，王永财，等. 基于SPOT/NDVI华北地区植被变化动态监测与评价[J]. 干旱区资源与环境，2013，27(9)：98－103. [LIU Bin, SUN Yanling, WANG Yongcai, et al. Monitoring and assessment of vegetation variation in North China based on SPOT/NDVI[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 98－103.]

[12] 郭铌. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象，2003，21(4)：71－75. [GUO Ni. Vegetation Index and Its Advances[J]. Journal of Arid Meteorology, 2003, 21(4): 71－75.]

[13] 李云鹏，格根图，娜日苏，等. MERSI资料在内蒙古草原牧草产量估测中的应用研究[J]. 干旱区资源与环境，2012，26(9)：154－159. [LI Yunpeng, GE Gentu, NA Risu, et al. The applied research on estimating the yield of forage in Inner Mongolia grasslands using MERSI Data[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(9): 154－159.]

[14] 廖清飞，张鑫，马全，等. 青海省东部农业区植被覆盖时空演变遥感监测与分析[J]. 生态学报，2014，34(20)：5936－5943. [LIAO Qingfei, ZHANG Xin, MA Quan, et al. Spatiotemporal variation of fractional vegetation cover and remote sensing moni-

toring in the eastern agricultural region of Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(20):5936－5943.]

[15] 贺振,贺俊平. 基于NOAA-NDVI的河南省冬小麦遥感估产[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(5):46－52. [HE Zhen, HE Junping. Estimation of winter wheat yield based on the NOAA－NDVI data[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013,27(5):46－52.]

[16] 毛志春,宋宇,李蒙蒙. 基于MODIS反演数据的河套地区荒漠化研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,2015,51(6):1102－1110. [MAO Zhichun, SONG Yu, LI Mengmeng. Research of the Desertification in Hetao Area Based on MODIS Inversion Data[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015,51(6):1102－1110.]

[17] PIAO S L, FANG J Y, ZHOU L M, et al. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2003,108(D14):4401.

[18] ZHOU L M, TUCKER C J, KAUFMANN R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2001,106(D17):20069－20083.

[19] YUAN X L, LI L H, CHEN X, et al. Effects of precipitation intensity and temperature on NDVI-based grass change over northern China during the Period from 1982 to 2011[J]. Remote Sensing, 2015,7(8):10164－10183.

[20] 陈秀妍,付碧宏,时丕龙,等. 2000—2016年中亚天山植被变化及气候分异研究[J]. 干旱区地理,2019,42(1):162－171. [CHEN Xiuyan, FU Bihong, SHI Pilong, et al. Vegetation dynamics in response to climate change in Tianshan, Central Asia from 2000 to 2016[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 162－171.]

[21] 刘春静,张丽,周宇,等. 中国新疆及中亚五国干旱区草地覆盖度反演与分析[J]. 草业科学,2016,33(5):861－870. [LIU Chunjing, ZHANG Li, ZHOU Yu, et al. Retrieval and analysis of grassland coverage in arid Xinjiang, China and five countries of Central Asia[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(5): 861－870.]

[22] 张晓彤,谭衢霖,董晓峰,等. MODIS卫星数据中亚地区生态承载力评价应用[J]. 遥感信息,2018,33(4):55－63. [ZHANG Xiaotong, TAN Qulin, DONG Xiaofeng, et al. Application of MODIS satellite fata in evaluating ecological carrying capacity of Central Asia [J]. Remote Sensing Information, 2018,33(4):55－63.]

[23] 夏楠,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,等. 新疆准噶尔东部荒漠区植被覆盖度遥感监测与评估[J]. 环境科学与技术,2017,40(1):167－173. [XIA Nan, TIYIP Tashpolat, NURMEMET Ilyas, et al. Remote sensing monitoring for assessing vegetation coverage in east Juggar Desert of Xinjiang[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(1):167－173.]

[24] 徐涵秋,唐菲. 新一代Landsat系列卫星:Landsat 8遥感影像新增特征及其生态环境意义[J]. 生态学报,2013,33(11):3249－3257. [XU Hanqiu, TANG Fei. Analysis of new characteristics of the first Landsat 8 image and their ecoenvironmental significance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3249－3257.]

[25] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment,2017,202(12):18－27.

[26] 郭华东,肖函. "一带一路"的空间观测与"数字丝路"构建[J]. 中国科学院院刊,2016,(5):535－541.[GUO Huadong, XIAO Han. Earth observation for the Belt-Road and Digital Belt-Road Initiative[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, (5):535－541.]

[27] 胡振华. 中亚五国志[M]. 北京:中央民族大学出版社,2006. [HU Zhenhua. Records of the five Central Asian countries[M]. Beijing:China Minzu University Press,2006.]

[28] HU Z Y, LI Q X, CHEN X, et al. Climate changes in temperature and precipitation extremes in an alpine grassland of Central Asia[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 126(3－4):519－531.

[29] JU J, ROY D P, VERMOTE E, et al. Continental-scale validation of MODIS-based and LEDAPS Landsat ETM+ atmospheric correction methods[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 122(7):175－184.

[30] ZHU Z, WOODCOCK C E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2012,118(3):8－94.

[31] 贾坤,姚云军,魏香琴,等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展,2013,28(7):774－782. [JIA Kun, YAO Yunjun, WEI Xiangqin, et al. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing[J]. Advances in Earth Science,2013,28(7):774－782.]

Vegetation coverage monitoring in the Central Asian countries using multi-temporal Landsat images

WANG Hua[1,2], YANG Qian-peng[1], TIAN Yun-jie[1], GUO Shan-chuan[3], TANG Peng-fei[3]
(1 *Nyingchi meteorological service. Nyingchi* 860000, *Xizang*, *China*;
2 *College of Resources and Environmental Sciences*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *Jiangsu*, *China*;
3 *School of Geography and Ocean Science*, *Nanjing University*, *Nanjing* 210023, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: Central Asian regions with a typical temperate desert as well as grassland environment experience several ecological environmental problems such as water shortages and land degradation. Particularly in recent decades, the ecological disturbances caused by climate change and human activity have led to more consideration being given to environmental protection. As the most essential producer of an ecosystem, vegetation coverage status can directly affect an ecosystem's function and structure. Therefore, to align with the sustainable development goal of the "Green Silk Road", there is a need to conduct vegetation coverage monitoring with wide-range and long-term abilities. In view of this, 12 periods of vegetation coverage in the Central Asian regions from 1993 to 2018 were estimated using the Google Earth Engine geospatial data cloud computing platform from Landsat 5 together with Landsat 8 remote sensing data sets. To start, the research area boundary was used as the selected condition to filter the Landsat images. Through data preprocessing, including a cloud mask, filter, and split, we acquired 12 high-quality remote sensing images over the Central Asian regions. Then, we calculated the normalized difference vegetation index using the NIR and RED bands of the selected images. The dimidiate pixel model was used to estimate the vegetation coverage, followed by a linear regression analysis. The results showed as follows: (1) The overall level of vegetation coverage in Central Asia was low but had significant spatial heterogeneity. (2) The vegetation coverage change trend of most regions in Central Asia between 1993 and 2018 was relatively stable. The vegetation coverage over the Kazakhstan Hills and Fergana Valley areas showed an increasing trend, while the vegetation coverage in the Ural River Basin and Syr Darya River Basin areas showed a negative trend. (3) In terms of the time series characteristics of the vegetation coverage, the total vegetation coverage increased by 3% in the Central Asian regions between 1993 and 2018, during which the vegetation coverage in Kyrgyzstan and Tajikistan increased by 3.96% and 5.86%, respectively. (4) The bare soil area showed a retreating trend, and its total area decreased by 259 000 km^2. (5) Lastly, the low vegetation, middle vegetation, and high vegetation cover areas showed an oscillatory increase. Overall, this study combined remote sensing data with geographical cloud computing to monitor vegetation coverage on a regional scale in Central Asia to provide technical support and quantitative data for ecological assessment and succession analysis in Central Asia.

Key words: vegetation coverage monitoring; the Central Asian Regions; Google Earth Engine; multi-temporal Landsat images; *NDVI*